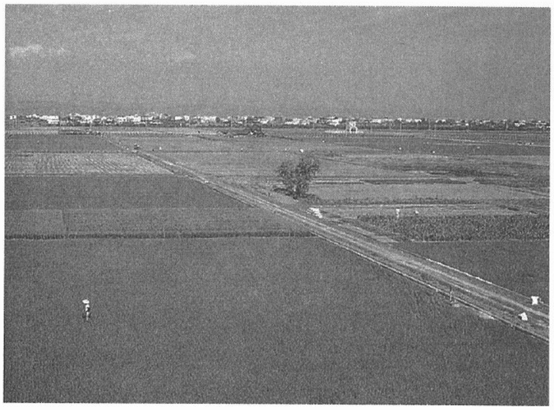
簡介農作物光譜

植被光譜特徵與植體水分含量之關係

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊ ◎農試所農藝組　陳榮坤　楊純明



一、植體內水分及功能

水是大自然界中的主要物質之一，亦是植物體內一項非常重要的組成分，佔植體鮮重的70-90%不等。一般言，在代謝旺盛的器官(如嫩葉、嫩果等)含水量較高，在生理活性弱的器官(如種子、孢子等)則含水較少。植物細胞必須在充足水分含量下，原生質才能進行各項生理活動，各種生化反應都必須以水為介質或溶劑才能進行。水還可以維持細胞膨壓，使細胞伸長、膨大，植株才能挺立、開展葉片，承受陽光進行光合作用。缺水導致膨壓降低時，生長即減緩或停滯。

水也是光合作用的基本原料之一，可見光和紫外光的能量經葉片上的葉綠體吸收啓動光合作用，經由水解反應展開各項生化、生理活動，並釋放出氧氣供需氧性生物進行呼吸之用。另外，水的高汽化熱(20℃時為2,454 J g^{-1})及高比熱(4.187 J g^{-1} ℃$^{-1}$)的物理特性，有利於發散植體自外界環境所吸收的輻射熱(能)，避免體溫大幅上升造成負面危害。水的表面張力、內聚力及吸附力在植物體內的運輸作用中更具有重要意義，帶動植體內化合物的循環。水分子的極性，亦可使許多化合物形成水合狀態，使原生質膠體維持穩定，在維繫植體各項機能上扮演關鍵角色(Gardner *et al*., 1985)。經由上述，水的重要性及必要性可見一般。

二、估測植體水分的目的

農作物植株的生長、代謝活性乃至於最終產量的高低，均明顯受到植體內水分狀態的影響。水分供應不足時，植株便進入凋萎狀態，若情況長期持續，植物即可能死亡。相反的，水分供應過量時，植株也無法正常生長。在長時間土壤積水或淹水狀態下，可

作者：陳助理榮坤
聯絡電話：04-23302301轉144

能造成植株根部無法呼吸或植體潰爛，嚴重時死亡。

因此，瞭解農作物生命週期中的需水規律，並確定其水分臨界值與臨界期且依生理所需供應水分，對確保農作物生產和經濟用水都有十分重要的意義。因此，如何簡捷而準確的測定植體內的水分狀態，以利於水分管理的進行並使植株在良好環境下生長，實爲農作物生產中的一大課題。

三、估測植體水分的方法及指標

有許多分法係根據農作物植株外觀形態，來偵測或估測農作物體內水分狀態或對水的需求，這些方法端賴特定徵狀的變化作爲判斷的標準。準確而可靠的特定徵狀，即可作爲辨識指標。例如嫩芽變紅、葉色轉爲濃綠、葉片捲縮、葉片角度改變、葉片韌性增加等，均是常用的判斷徵狀（黃彥三，2000；楊純明及張富洲，1991）。這些利用外觀形態的辨識方法簡便易行，但準確性較差。

生理性狀如細胞水勢和氣孔開度等，則是較爲準確的辨識指標，可以相當明確的表示植體內的水分平衡狀況。水勢(water potential)爲植物體內或土壤中水分能量狀態的最佳指標，其數值乃指與純水化學勢間的下降量。早在1938年時，Meyer首先以擴散壓差（diffusion pressure deficit , DPD）的概念表示細胞置於純水中水分經由擴散進入細胞之壓力，以DPD＝OP－TP表示，式中OP爲細胞內容物滲透壓(osmotic pressure)，TP爲細胞內的膨壓(turgor pressure)，三項壓力名詞均爲正值，此一概念被廣泛應用達20年之久。1960年Slatyer and Taylor以熱動力學爲基礎，利用水分自由能量之損失來說明植物體內水分之流向，將滲透壓、膨壓及擴散壓差的用語分別變更爲滲透勢(osmotic potential, ϕ s)，壓力勢(pressure potential, ϕ p)及水勢(water potential, ϕ w)，並以ϕ w＝ϕ s＋ϕ p公式來表示，惟ϕ w與ϕ s 爲負值，ϕ p與TP相等且通常爲正値。但對於植體木質部，處於蒸散狀態下其ϕ p與TP通常爲負值。這套理論使得不論是土壤或植體的水分狀態，均可依據熱動力學的基礎以水勢進行討論(黃彥三，2000)。

水勢的測量方法甚多，如組織重量變化法（tissue weight-change method）可用於組織中所有細胞，由於方法簡易，多用於教學上來說明水分潛勢的原理。實驗室中另常用的方法甚多，如溫差熱電偶乾濕球濕度計測定法(thermocouple psychrometry)、冰點降低法(cryoscopic method)、初發原生質分離法(incipient plasmolysis)及用於測量樹液的壓力室法(pressure chamber)等，分別適用於不同狀況下量測水分潛勢(Tai and Zeiger, 1998)。

除了測量植體水勢之外，還有在樹液流中設定指標以測定野外樹木的樹液流速度的熱脈衝波(heat pulse)法、依據植體直徑變動間接估算水勢的莖直徑測量法(stem diameter measurement)等(黃彥三，2000)，可供利用於評估植體水分狀態。惟不論是形態指標、測量植體水勢或標定樹液流速度，這些方法雖然簡單容易，但結果的取得仍然太慢或僅止於在實驗室使用，無法快速而大面積的反應植體或族群植被的水分狀態。

Tanner(1963)提出以冠層溫度作爲植物缺水指標後，冠層溫度法成爲診斷作物水分

狀態的一項重要技術。30多年來研究人員相繼提出冠層溫度變異法、參考溫度法、冠層與氣溫差法（stress days degree）及作物缺水指標法（crop water stress index）等，皆以植冠(植被)的溫度爲基礎(Penuelas *et al.*, 1992, 1993)。這些診斷方法雖然具有快速而大面積估測的特點，但是容易受到環境的影響，有時候溫度差異不足以說明農作物水分在時間及空間上隨著環境的巨大變化。近年來，隨著分光光譜解析度的提升，農作物植體水分狀態的變化與其光譜反射率間密切的相關性，使得利用光譜檢測作物水分的可行性增高。

四、水分的吸收光譜

太陽光是地球上絕大部分生物能量的來源，在物理學上來說，由於波長不同，分成數種不同性質的輻射線。輻射線光譜中，從波長最短的宇宙射線(cosmic rays)起，依次爲加瑪射線(γ ray)、愛克斯光(X ray)、紫外線(ultraviolet)、可見光線(visible light)、紅外線(infrared)、微波(microwave)、無線電短波(radio short wave)、無線電中波(radio middle wave)和無線電長波(radio long wave)等。不過各種射線波長的劃分，也有稍爲重疊的部份，視實際性質而定。

大氣層外的太陽光經大氣層中的水汽、二氧化碳、臭氧及其它微塵粒子的攔截吸收或反射後，到達地面的光輻射大部份爲可見光與近紅外光，以及少量的紫外光。太陽光的光譜可從紫外線一直延伸到紅外線，以能量分佈來說，主要是在狹窄的可見光波段(約佔50%)，其他則爲紫外線(約佔7%)、紅外線(約佔43%)。這些輻射光能進入植物體後，可見光波段部份(400～700 nm)被綠色植體中的葉綠體及其它細胞色素吸收利用；近紅外光波段(700～1300 nm)則受細胞間隙、細胞壁的反射，而呈現較低的吸收率；介於1300～3000 nm的短、中波紅外光波段受植體內水分影響最大，多被水分吸收而呈現低反射比；熱紅外光波段(3～14 μm）則自由進出植體(Puritch, 1981；Fogal *et al.*, 1997）。

液態水分的吸收光譜在820、940、1150、1450及1920 nm有較高的反射率(Curcio and Petty, 1951)。惟在植體內，太陽光遭受不同物質及構造的影響，其吸收光譜往往有不同的表現，在近紅外光區尤甚。

五、葉片的反射光譜

可見光譜(400～700 nm)及短、中波紅外光波段(700～3000 nm)明顯受植體內部生理狀態的影響。這些生理狀態主要是隨著葉片葉綠素含量及葉片水分含量的改變而變化(參見圖一)。葉片葉綠素含量影響可見光及近紅外光(500～900 nm)的光譜表現，葉綠素含量愈高，吸收率增加，反射率降低。800～1300 nm間的光譜呈現高反射率，主要受到葉片內部構造的影響所造成的結果。1300～2500 nm的高吸收光譜則受葉片水分含量的影響最大(Carter 1991)，其次爲植體內木質素對此波段光譜的吸收(Gao and Goetz, 1994)。

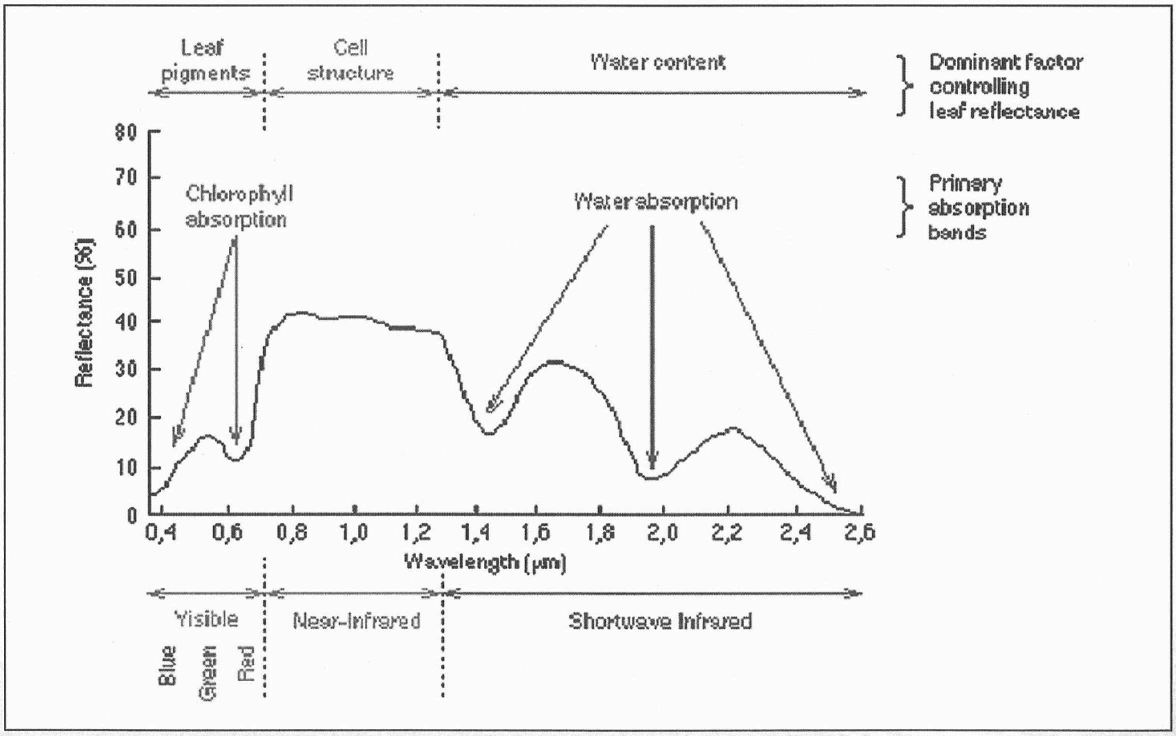
由上述可知，植體中的水分也會吸收照射到葉片的光輻射，而減低其光譜反射率。植體水分降低時，則光譜反射比率增加。水分對光譜的吸收主要發生在短波紅外光區（short wave infrared, SWIR），但其影

響也延伸到可見光區，惟不若葉綠素般強烈。紅外光區中，當葉片水分變化時，1450、1940及2500 nm的光譜表現甚爲敏感；而可見光區雖然有葉綠素的干擾，但在480及680 nm附近也有敏感的表現。

由研究文獻中發現，農作物植體在760、970、1190、1450、1900及1940 nm附近的光譜反射率可反映植物的水分狀態(Curran, 1989；Gao and Goetz, 1994；Raymond and Roger, 1999)。另Jackson(1985)指出，缺水棉花的光譜表現與常態非缺水狀態下明顯不同；Michio *et al.*(1989)以960 nm處的倒數光譜監測水稻的缺水狀態；Penuelas *et al.*(1993）以R970 nm/R900 nm比值作爲小麥水分狀態的指標。因此若能利用植物光譜分析技術，在農作物發生肉眼可見水分逆境病徵之前，早期預估植株所處的逆境狀態，將有助於及時對農作物進行適當管理而減少水分逆境對農作物的傷害。

六、植被光譜特徵與植體水分狀態關係模式之應用

爲使農作物光譜分析技術應用到田間水分管理工作，許多學者開始致力於植被光譜特徵與作物水分狀態間關係的建立，因而發展出數種指標以檢測農作物葉片或植被的水分狀態。



圖一、各性狀在綠色植體中的光譜表現模式。
(摘取自University College London, Department of Geography, Staff Homepages, http://www.geog.ucl.ac.uk/, 2001）

植被光譜特徵與植體水分含量之關係

(一)植體健康狀態指標

理想的農作物應含有充足水分及高葉綠素含量的大形葉片，俾發揮生長潛力。農作物植被反射光譜中，對可見光部分之紅光波段吸收最強，因此紅光波段的反射率(比)最低，可據以表示綠色植被的覆蓋率。紅光臨界(或稱紅光邊緣，red edge)是葉綠素吸收可見光光譜的紅光並急速轉變到由充滿水分的細胞壁及細胞間隙所影響的近紅外光之間的波長(段)，因此紅光臨界的波長愈長表示細胞膨壓愈大，植物愈健康。所以，具有高近紅外光反射率(NIR)及低紅光反射率(RED)的作物反射光譜，代表其族群擁有較佳的綠色植被覆蓋率。Jordan(1969)以RVI（ratio vegetation index）作爲作物植株健康與否的指標：

RVI＝NIR／RED

RVI值愈高，顯示代表高植被覆蓋率的NIR較大，而代表高光合作用率的RED較小，因此綠色植被覆蓋率高。高RVI值又隱示植被膨壓高而生長旺盛。然RVI的值並無界限，不易進行比較，因此Rouse *el al.* (1974)年提出NDVI(normalized difference vegetation index）以取代RVI。基本上NDVI與RVI在功能上是相同的，只是值的範圍不同，NDVI值不大於1。

NDVI＝（NIR－RED）／（NIR＋RED）

NDVI的範圍：綠色植體0 ＜ NDVI ≦ 1
土壤：0 ≦ NDVI ≦ 1
水分：-1≦ NDVI ≦ 1

事實上NDVI是一個物質光譜狀態的綜合指標，被廣泛使用在反應綠色植體、土壤及水分的實際狀況。以植體水分來說，NDVI愈大，則植體水分含量愈高。Yang and Su(2000)指出，土壤缺水程度愈高，水稻植被的NDVI值愈低。

(二)植體水分指標

以單一葉片來說，1300_1500 nm波段的反射率對葉片水分有高度的敏感性，但當植體全株或族群植被水分吸收強烈時，其光譜表現相差甚小，不適於準確測量植體或植被水分狀態。Penuelas *et al.*(1993)指出對水分吸收敏感度稍弱的950～970 nm波段間的近紅外光在水分吸收強烈時表現出植體內水分狀態的差異，並將970 nm與水分不吸收但與葉片構造有直接相關的900 nm做一比值PWI(plant water index)：

PWI＝R970/R900

PWI與植體相對水分含量、葉片水分潛勢、氣孔導度及細胞壁彈性的改變有相關性存在（Penuelas *et al.*, 1996）。Penuelas *et al.*(1997)進一步指出，PWI的倒數WI（water index）經NDVI的標準化後（WI/NDVI），其與植體水分的相關性更高。但WI在LAI（leaf area index）高度變化的情形下，則無法顯現整體植被的水分差異。Champagne *et al.*(2001)發現隨著植株的生長，植被水分吸收波長敏感波段(trough)由940 nm逐漸移轉到980 nm（單一葉片的水分吸收太弱，無法表現此一現象），並指出WTI（water trough index）在LAI呈現變異的情形下，與植被的葉片水分含量有高度相關：

WTI＝R900/R (min 940 980)

但WTI並無法去除植冠內部結構的干擾，使得WTI與LAI之間的關係仍有差異。若要以WTI作爲植物水分逆境的指標，則必須將其標準化。

七、結　語

水分管理是田間管理的重要一環，過多或匱乏均不宜農作物生長。對於水資源有限的臺灣地區，農業用水一直引起各方爭議，確實有必要加強農作物生產之水分管理有關研究，以求充分而有效的利用寶貴水源。近年來光譜遙測在各方面的研究與應用發展十分蓬勃，世界各先進國家莫不積極投入巨資和人才進行深入探討，並也實際利用於各種產業的作業運轉。

農作物葉片及植被的光輻射反射率(比)主要隨著葉片的生化組成而改變，受環境影響小，且操作方便，時效性高、實用性強，並可達到野外實地測量的目的。因此，葉片或植被水分吸收光譜或反射光譜分析技術可作爲非破壞性且即時、快速、方便的田間植體水分狀態診斷，並可提供在進行大面積的空中遙測地表植被生長或水分狀態時一良好之參考指標。惟遙測的過程中所受空氣中水汽及微塵的影響較大，必須再進行修正，此外植被的立體結構如葉面積、葉片角度與分布、葉齡、老化程度及葉片組織差異等，也是光譜遙測時必須考慮的項目。欲獲得準確的估測，應將這些變數加以去除，才能增加植被水分狀態與植被光譜特徵的相關性。

八、引用文獻

黃彥三。2000。樹木水分狀態及樹冠截雨效應非破壞連續監測技術之研發。林業研究專訊第35號。http://www.tfri.gov.tw/news/35/6.htm。

楊純明、張富洲。1991。水稻逆境之探討。科學農業39(9-10):219-224。

Carter, G. A. 1991. primary and secondary effects of water concentration on the spectral reflectance of leaves. *American journal of Botany*. 78: 916-924.

Champagne, C., P. Elizabeth, B. Abdou and B.S. Ian. 2001. Mapping crop water stress: Issues of scale in the detection of plant water status using hyperspectral indices. *Agriculture and Agri-Food Canada*.

Curcio, J. A. and C.C. Petty. 1951. The near infrared absorption spectrum of liquid water. J. Opt. Soc. Am. 41:302-304.

Curran, P J. 1989. Remote sending of foliar chemistry. Remote Sensing of *Environment*. 30: 271-278.

Fogal, W., T.C. Hutchinson and A.T. Thriscutt. 1997. Bioindicators of forest health and sustainability. *Forest Research Information Paper*. No.138.

Gao, B. and A.F.H. Goetz. 1994. Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 47: 369~374

Gardner, F. P., R.B. Pearce. and R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. *The lowa State University Press*. pp.76-91.

植被光譜特徵與植體水分含量之關係

Jackson, R. D. 1985. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal of Remote Sensing*. 6:177-185.

Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. 50:663-666.

Michio, S. and A. Tsuyoshi. 1989. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and-above-ground dry phytomass. *Remote Sensing of Environment*. 27: 119-127.

Penuelas, J., R. Save, O. Marfa and L. Serrano. 1992. Remote measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 58:63-77.

Penuelas, J., I. Filella, C. Biel, et al. 1993. The reflectance at the 950~970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*. 14(10): 1887-1905.

Penuelas, J., I. Filella, L. Serrano and R. Save. 1996. Cell wall elasticity and Water Index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 373-382.

Penuelas, J., J. Pinol, R. Ogaya and I. Filella. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI(R900/R970). International Journal of Remote Sensing. 18:2869-2875.

Puritch, G.S. 1981. Nonvisual remote sensing of trees affected by stress: A review. Can. For. Ser., For. Tech. Rep. 30. Victoria, BC, Canada.

Raymond, F. K. and N.C. Roger. 1999. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorptionfeatures and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*. 67: 267-287.

Rouse, J.W., R. H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradition (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1-371.

Tai, L. and E. Zeiger. 1998. Plant Physiology. *The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc*. pp.72-75.

Tanner, C. B. 1963. Plant temperature. *Agron*. J. 50:210-211.

Yang, C. M. and M. R. Su. 2000. Analysis of spectral characteristics of rice canopy under water deficiency. *The 21st Asian Conference on Remote Sensing*. Dec. 4-8:13-18.